

南水北调中线工程对汉江中下游水华的影响及对策研究 (I)

——汉江水华发生的关键因子分析

谢 平¹, 夏 军^{1,2}, 窦 明¹, 张万顺¹

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 为了评估南水北调中线工程对汉江中下游水华的影响, 在广泛现场监测、资料收集、调查论证工作的基础上, 应用水动力学模型和富营养化动力学模型对汉江水华发生的成因和关键因子进行了分析。汉江水华发生的主要原因有 3 个: 汉江中游进入城区的排污量日趋增大, 藻类等生物所需的氮、磷等营养物质严重过量(此乃根本原因); 汉江水枯同时长江水位增高使汉江流速变缓, 产生类似于湖泊的水流特性; 春季气温偏高。在已满足藻类生长需求的营养条件下, 流量和流速是制约汉江水华发生的关键(敏感)因子, 南水北调中线工程对汉江中下游水华的影响将主要体现在水文因子上。

关键词: 南水北调中线工程; 汉江; 水华; 对策; 关键因子

中图分类号: P333.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-3037(2004)04-0418-06

1 引言

南水北调工程的研究始于 20 世纪 50 年代, 历时半个世纪。虽然在调水工程规划方面已完成对环境影响评价等工作, 但中线调水工程对汉江中下游生态环境的影响量化研究, 相对考虑得很少或者比较简单。随着国家对环境保护和可持续发展的高度重视, 这些问题越来越受到国内外广泛关注。另一方面, 自 80 年末尤其是 90 年代后, 汉江中下游水体富营养化的生态环境问题越来越突出。1992 年春季枯水期、1998 年春季枯水期至平水期, 以及 2000 年春季, 在汉江中下游相继发生了多次严重的水华事件, 即在汉江这样一个常年流动的河流发生了类似于湖泊水库的藻类疯长, 并污染水体的现象。由于汉江是武汉市重要的饮用水源, 同时又是工业、农业用水水源, 该区段水体的功能类别为集中式生活饮用水源一级保护区。因此, 汉江中下游日趋严重的水体富营养化, 即水华问题, 对武汉市城市供水所产生的严重影响, 已引起社会广泛关注和担忧。由于南水北调中线工程从汉江上游丹江口水库调水, 其中汉江中下游多年平均径流量将显著减少, 从而改变汉江中下游的水文情势, 加上全球气候变暖将使温度升高, 汉江武汉段社会经济的发展将使污水排放量增加, 造成汉江水体质量恶化的因素在客观上将逐渐增强。

为了开展南水北调中线工程对汉江中下游水华生态环境问题的量化研究, 在广泛现场监测、资料收集、调查论证工作的基础上, 应用水动力学模型和富营养化动力学模型对汉江

收稿日期 2003-11-13; 修订日期 2004-02-25。

第一作者简介: 谢平(1963~), 男, 湖北松滋人, 教授, 博士, 主要研究变化环境下的水文水资源及水环境。

©1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net
致谢: 本项研究得到了水利部南水北调规划设计管理高、湖北省南水北调中线工程办公室、湖北省环境保护局的资助, 在此表示衷心的感谢。

水华发生的成因和关键因子进行了分析,针对中线工程 $145 \times 10^8 \text{m}^3$ 调水方案,考虑无引江济汉和有引江济汉两种情况对汉江水华发生的概率^[1]进行了定性分析和定量计算,并提出了相应的防治对策。

2 汉江水华现象

水华亦称水花(algae bloom),指在淡水湖泊水体中,由于大量生活污水和工业废水排放以及农业非点源污染,造成水质富营养化,诱使某些蓝绿藻等大量繁殖,使水面形成较厚一层蓝绿色藻膜,藻类死亡腐败后分解出有毒致癌物质,并消耗水体中的大量溶解氧,使水体产生恶臭的一种自然现象。藻类水华主要发生在富营养化的湖泊或池塘,河流一般比较罕见。

20 世纪 90 年代,汉江水体中曾 3 次出现水华,汉江水华为硅藻水华,属硅藻类小环藻。到目前为止,3 次水华均发生在冬末春初时节的汉江枯水期。第一次水华出现在 1992 年 2 月中旬到 3 月初,自潜江以下 240km 江段上;第二次发生在 1998 年 2 月底,涉及的范围较第一次有所扩大,从汉口逆江而上长达 400km 江段;第三次发生在 2000 年 2 月底至 3 月初。硅藻在水中与蓝藻不同,呈悬浮状(蓝藻漂浮在水面),发生硅藻水华时,汉江水色一反往日的碧清,河水变为褐色,色度明显增加,自来水(宗关水厂)有明显的腥味,水体中藻类猛增,造成自来水厂水处理极为困难,市民饮水一度受到影响。

在 3 次水华出现时,湖北省环境监测中心站、武汉市环境监测中心站、武汉市自来水公司和中科院水生生物研究所等单位及时进行了调查与水质监测^[2-4],结论如下:

1992 年发生水华时,汉江武汉宗关断面藻类细胞总数峰值达 0.21×10^8 个/L,1998 年出现水华时,该断面藻类峰值高达 0.33×10^8 个/L,与正常年度同期相比增加了两个数量级,优势种为小环藻。2000 年出现水华时,汉川石调与武汉市新沟断面藻类峰值高达 0.43×10^8 个/L 以上,汉江中下游水体藻类细胞总数从中游到下游逐渐增加,而且藻类种群的多样性指数呈下降趋势,下游江段水华发生时优势种小环藻所占比例明显增加。

3 应用模型简介

3.1 水动力学模型

运用河流水动力学模型可以对河道单元水体的流速、流量、水位和断面面积进行定量描述。本文采用河流一维水动力学模型,模型计算范围从仙桃至龙王庙(龙王庙断面与汉口水文站距离很近,水面比降很小,因此龙王庙的水位条件可由汉口水文站的水位耦合计算得出),取 25 个断面,分 24 段进行。

水流应满足圣维南方程组:

$$\textcircled{1} \text{ 连续方程} \quad \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\textcircled{2} \text{ 动量方程} \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + U \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial z}{\partial x} + gA \frac{n^2 Q^2}{R^{4/3}} = 0 \quad (2)$$

式中 t 为时间坐标, x 为空间坐标, Z 为水位, Q 为流量, B 为水面宽度, U 为断面平均流速, g 为重力加速度, A 为过水断面面积, q 为单位长度旁侧入流流量, R 为水力半径, n 为糙率。

3.2 富营养化动力学模型

富营养化动力学模型设有 7 个水质变量,分别为:藻类(PHYT)、化学需氧量(COD)、溶解氧(DO)、氨氮(NH_3)、硝酸盐氮(NO_3)、有机氮(ON)、总磷(TP)。它们被划分为 4 个相互作用的子系统:藻类动力学子系统、氮循环子系统、磷循环子系统和溶解氧平衡子系统,其结构如图 1 所示。

模型的基本方程是平移-扩散质量迁移方程,在方程里除了平移和扩散项外,还包括由生物化学作用引起的源漏项。各水质指标的基本方程表达为:

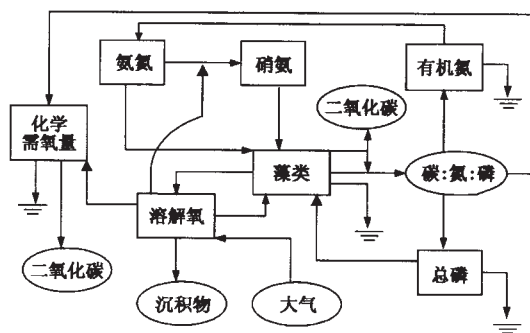


图1 汉江富营养化模型结构

Fig. 1 Structure of the eutrophication model in Hanjiang River

$$\frac{\partial}{\partial t}(AC) = \frac{\partial}{\partial x}(-UA C + E_x A \frac{\partial C}{\partial x}) + AS \quad (3)$$

式中 C 为水质指标的断面平均浓度, E_x 为河流纵向扩散系数, S 为水质指标的源漏项。

藻类动力学子系统在富营养化模型中占有重要位置, 直接影响了其他几个子系统。藻类源漏项可以由藻类生长率、衰减率和沉降率来表示, 其中生长率主要取决于水温、光照、营养物质浓度等环境条件的影响。氮和磷两种元素作为藻类生长所必需的营养物质被摄入, 同时又随着藻类的死亡和内源呼吸过程释放出。溶解氧平衡也受到双重作用: 大气复氧和藻类生长期间光合作用释放出氧是其来源, 藻类的呼吸作用、水体中含碳物质的氧化作用及硝化作用导致了其消耗。有关富营养化模型各水质变量源漏项的表达式可查阅参考文献[5]。

4 汉江水华成因分析

通过对 1992、1998 和 2000 年 3 个典型年进行对比研究, 表明汉江发生水华的原因具有一定相似性, 具体表现在以下几个方面:

(1) 运用河流水动力学模型^[5], 对 1992~2000 年期间宗关断面历年流量、流速年际变化过程进行模拟计算, 从过程线上可以看出, 在发生水华的 1992、1998 和 2000 年中枯水期(2、3月)的流量、流速是历年来最小的, 而同期藻类数量却达到最大值。进一步分析实测水文资料得出, 1992 年 2 月仙桃站平均水位为 23.90m, 比 1970 年以来的历年同期平均水位(25.00m)低 1.10m, 与此相反, 1992 年 2 月武汉关水位为 14.40m, 比 1970~1990 年同期平均水位(13.88m)高 0.52m。1998、2000 与 1992 年情况类似, 流量、流速减小导致汉江水体运动性能变差, 自净能力降低, 同时受到长江较高水位的顶托, 汉江表现出类似于湖泊的水流特性, 这就为水华的发生提供了必要的环境。

(2) 气温偏暖致使水温升高, 充足的光照、温暖的水环境为藻类疯长提供了适宜的气候条件。据气象资料统计: 1992 年 2 月中下旬, 武汉、汉川、仙桃的日平均气温分别比本地 1991 年同期升高 4.0℃、3.7℃、3.7℃, 而 1998 年同期最高温度高达 21℃, 水温较气温虽有滞后现象, 但由于 1、2 月份汉江中下游基本无雨, 持续高温, 因而水温较往年同期偏高。汉江水华发生时水温都有明显偏高的不正常现象。

(3) 汉江上游断面和两岸的工农业和生活污水的自流排放为藻类疯长提供了必要的氮、磷等营养元素, 营养物质的氮磷比达到藻类生长的最佳状态是导致水华发生的最根本原因。从水质资料分析得出, 在水华发生期间(1992、1998 和 2000 年 2~3 月份), 总氮与总磷之比(TN/TP)大致在 10~15 之间, 尤其在 13 左右水华最严重。

由此得出汉江水华产生的主要原因: 汉江中游进入城区的排污量日趋严重, 藻类等生物所需的氮、磷等营养物质严重过量; 汉江水枯同时长江水位增高使汉江流速变缓, 产生类似

于湖泊的水流特性,春季气温偏高。在营养物充分、气温增高和水流变缓的同时作用下,极易诱发藻类大量繁殖,并产生严重的水华现象。

5 水华发生关键因子分析

为了弄清制约水华发生的关键因子,选择 1992 和 1998 年为典型年,并针对影响藻类生长的各因子,从水质模型的角度进行灵敏度分析,确认各因子对水华发生的贡献。

(1)通过富营养化动力学模型对藻类生长所必需的氮磷营养条件进行调试发现,当水体中总氮浓度高于 1.0mg/L,总磷浓度高于 0.07mg/L 时,营养条件已经基本满足藻类生长的需求;同时对 1992~2000 年汉江下游宗关断面 2~4 月份总氮和总磷水质资料进行比较发现,汉江水质条件每年均已满足藻类生长的需求(表 1),但并不是每年都发生水华事件。由此可认为,在已满足藻类生长需求的营养条件下,总磷、总氮等水质因子不是造成汉江水华发生的关键(敏感)因子。但从水污染的角度来看,总磷、总氮等水质因子是造成汉江水华发生的关键因子。

表 1 宗关断面历年 2、3 月份总氮和总磷平均浓度(mg/L)

年份	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
总氮	1.216	1.329	0.973	1.085	1.246	1.336	1.653	1.494	1.354
总磷	0.080 7	0.088 2	0.094 9	0.098 3	0.073 7	0.099 4	0.196 2	0.158 9	0.131 8

(2)通过富营养化动力学模型对 1992 和 2000 年的水温进行调试发现,在较低的水温条件下(水温低于 5℃)藻类的生长将会受到较大的制约,而一般藻类最佳生长水温在 20~30℃左右。进一步对宗关断面实测水温资料进行分析发现,在 20 世纪 90 年代其它年份或月份水温也相对偏高(表 2),却并未发生水华现象,同时考虑到水温受气温的影响,年际间周期性变化比较稳定,因此,可认为水温等气候因子不是造成水华发生的关键因子。

表 2 宗关断面历年 2、3 月份平均水温(℃)

年份	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	2000
水温	11.00	11.20	12.62	11.57	10.18	11.56	12.50	11.48

(3)在发生水华的 1992、1998 和 2000 年,仙桃站 2、3 月份的流量、水位是历年来最小的(表 3),而此时长江汉口站流量、水位均比历年同期高(表 4)。由于受到长江较高水位的顶托,从而导致汉江水流速度减缓(表 5),因此,可以认为流量、流速是制约汉江水华发生的关键因子。进一步通过综合水质生态模型对 1992 和 2000 年仙桃站 2、3 月份平均流量进行调试发现,当流量高于 530m³/s 时,则可达到有效防止水华发生的目的,考虑到当时长江水位的顶托作用,该流量在寻常年份还可适当缩小,建议以仙桃流量 500m³/s 作为水华发生的警戒流量。

表 3 仙桃断面历年 2、3 月份平均流量和平均水位

年份	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
流量(m ³ /s)	485.1	1 177.4	850.0	718.1	643.8	1 069.8	363.1	639.7	360.6
水位(m)	23.94	25.46	25.05	24.85	24.63	25.41	23.47	24.21	23.24

表 4 汉口断面历年 2、3 月份平均流量和平均水位

年份	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
流量(m ³ /s)	9413.074	10572.9	9810.1	11414.3	7737.1	10958.1	15155.6	61292.1	11451.1
水位(m)	15.94	14.99	15.21	15.99	13.67	15.73	17.77	13.35	15.82

表5 宗关断面历年2、3月份平均流速

Table 5 Average flow velocity of Zongguan section from Feb. to Mar. over the years

年份	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
流速(m/s)	0.213	0.583	0.410	0.319	0.396	0.479	0.130	0.414	0.168

总之,氮、磷等水质因子和水温等气候因子不是制约汉江水华发生的关键因子,流量、流速等水文因子才是制约汉江水华发生的关键因子。由于南水北调中线工程本身不会产生污染源,对汉江中下游水温的影响也非常有限,因此,南水北调中线工程对汉江中下游水华的影响将主要体现在流量、流速等水文因子上。

参考文献(References):

- [1] 谢平,夏军,等.南水北调中线工程对汉江中下游水华的影响及对策研究(II)——汉江水华发生的概率分析及防治对策[J].自然资源学报,2004,19(5):待刊.[XIE Ping,XIA Jun *et al.* Research into the effects of the middle route of China's south-to-north water transfer project on water bloom in the middle-down stream of Hanjiang River and the countermeasures part II:A probability analysis of the water bloom in Hanjiang River and prevention countermeasure.*Journal of Natural Resources*,2004,19(5):in press.]
- [2] 沙鸿勋.对汉江两度出现水华污染的思考[J].环境导报,1998,3:23~24.[SHA Hong-xun.Thoughts on the water bloom pollution in the Hanjiang river.*Environment Herald*,1998,(3):23~24.]
- [3] 卢大远,刘培刚,等.汉江下游突发水华的调查研究[J].环境科学研究,2000,13(2):28~31.[LU Da-yuan,LIU Pei-gang,*et al.* The investigation of "water bloom" in the downstream of the Hanjiang river.*Research of Environmental Sciences*,2000,13(2): 28~31.]
- [4] 张家玉,罗莉,等.南水北调中线工程对汉江中下游生态环境影响研究[J].环境科学与技术,2000,(增刊):1~32.[ZHANG Jia-yu,LUO Li,*et al.* Research of the bioenvironmental effects of the middle route of China's south-to-north water transfer project in the middle-down stream of Hanjiang river.*Environmental Sciences and Technologies*,2000,(supplement):1~32.]
- [5] 夏军,窦明,等.汉江富营养化动态模型研究[J].重庆环境科学,2001,19(7):20~23.[XIA Jun,DOU Ming,*et al.* Dynamic model of eutrophication in Hanjiang River.*Chongqing Environmental Science*,2001,19(7):20~23.]

Research into the effects of the middle route of China's south-to-north water transfer project on water bloom in the middle-down stream of Hanjiang River and the countermeasures Part I : An analysis of the key factors generating water bloom in Hanjiang River

XIE Ping¹, XIA Jun^{1,2}, DOU Ming¹, ZHANG Wan-shun¹

(1.State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University,Wuhan 430072, China;2.Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research,CAS,Beijing 100101,China)

Abstract: In order to evaluate the effects of the middle route of China's south-to-north water transfer project (MR-SNWTP) on water bloom in the middle-down stream of Hanjiang River, based on monitoring data, collected information and investigation work, the reasons and key factors for Hanjiang's water bloom are analyzed by applying hydrodynamic model and dynamic model of eutrophication. There are three major reasons accountable for the generation of Hanjiang water bloom. The first and main one is that there are more and more polluted drainage from the middle

stream to the down stream of Hanjiang River and excessive nutrition material needed by algae such as nitrogen,phosphorus,etc.The second one is that the water velocity in Hanjiang slows down when Hanjiang River has low water level and Yangtze River has high water level,and Hanjiang River has the flow characteristics like lakes.The third one is higher temperature in spring.Under the nutrition condition needed for algae growth,the discharge and water velocity are the key factors to restrict water bloom in Hanjiang River.The effects of MR-SNWTP on the water bloom in the middle-down stream of Hanjiang River will embody mainly on hydrological factors.

Key words: the middle route of China 's south-to-north water transfer project; Hanjiang River; water bloom; countermeasure; key factor

中国自然资源学会第五次全国会员代表大会在北京隆重召开

中国自然资源学会第五次全国会员代表大会暨学术研讨会于2004年4月26-27日在北京隆重召开。这是团结和动员广大资源科技工作者为我国经济、社会的全面协调和可持续发展而努力奋斗的一次重要会议。大会的主要议程是选举产生中国自然资源学会第五届理事会,表彰先进,开展学术研讨。第四届理事长石玉林院士出席了大会并致开幕词,中国科协副主席胡启恒院士、中国科学院资源环境与技术局陈泮勤副局长分别代表中国科协和中国科学院出席大会并作了重要讲话。郑度院士、国土资源部办公厅吕国平主任出席了开幕式。来自全国31个省、市、自治区的代表和兄弟学会的代表参加了这次盛会。

代表审议、通过了石玉林理事长关于第四届理事会的工作报告,听取何贤杰副理事长《关于修改中国自然资源学会章程的说明》,审议、通过了《中国自然资源学会章程》,审议、通过了陈传友副理事长关于第四届理事会的财务报告,审议、通过了史培军副理事长关于《中国自然资源学会会员会费缴纳管理办法》,重点讨论了会员会费缴纳标准,审议、通过了陈传友副理事长关于《中国自然资源学会第五届理事会选举办法》和《中国自然资源学会学术年会制度》,听取了《自然资源学报》编辑部工作报告。

大会选举产生了第五届理事会,120名第五届理事候选人全部当选。第五届理事会召开第一次全体会议,选举产生了第五届理事会常务理事和学会领导人。第五届理事会理事长:刘纪远,常务副理事长:成升魁,副理事长:史培军、李善同、何贤杰、王浩、张福锁,秘书长:沈镭。大会还通过了中国自然资源学会学术顾问委员会和名誉理事长。会议表彰了福建省自然资源学会等4个“先进集体”,周荣汉等23名“先进工作者”,何大明等7名“优秀青年科技工作者”。

在第五届常务理事会第一次会议上,与会的常务理事重点研究了今年的主要工作,讨论了《中国自然资源学会学术年会制度》方案和学会专业委员会设置框架。

国土资源部办公厅吕国平主任在大会上作了题为“我国国土资源形势”的主题报告。特邀为大会作学术报告的专家还有刘纪远研究员:“基于空间信息的可持续发展动态监测、评估与综合区域规划体系”;史培军教授:“资源学科的建设与发展”;李善同研究员:“经济与自然协调发展”;夏军研究员:“变化环境下水文水资源研究面临的问题与挑战”;关凤峻研究员:“当前国土资源经济研究的热点问题”;张福锁教授:“保障国家粮食和环境安全的养分资源综合管理”等。

专家指出,党的十六届三中全会提出了“坚持以人为本,树立全面、协调、可持续的发展观,促进经济社会和人的全面发展”的要求,这对我国资源科技工作者提出了新的要求。中国是一个人口众多、资源相对匮乏的国家,中国社会、经济的发展,资源是重要的支撑。资源科技工作者表示要坚持科学发展观,注重以人为本,努力为形成有利于节约资源的生产模式和消费方式,建设资源节约型社会多作贡献,推动经济社会全面、协调、可持续发展。

中国自然资源学会成立20年来,在历届理事会的领导下,在中国科学院和挂靠单位的大力支持下,团结和依靠广大会员,围绕国家经济建设中的资源问题,积极开展学术交流和科技咨询活动,为推进社会主义现代化作出了重要贡献;大力推动科学普及,出版了中国自然资源丛书等一批科普书籍,填补了资源领域在科普方面的空白,受到青少年的欢迎;积极促进学科建设,《中国资源科学百科全书》的出版、《资源科学》专著以及一批资源科技工作者关于资源科学论著的撰写和出版;“资源科学科技名词”的编写,初步建立了资源科学的学科体系与理论框架,这在资源科学发展过程中具有重大意义。尤其是在我国建立资源科学的学科地位问题上,中国自然资源学会做了不懈的努力。在几代资源科技工作者的共同努力下,使资源科学与技术作为一级学科列入自然科学学科目录。努力发挥学会的桥梁和纽带作用,相继建立了12个专业(工作)委员会,分布在资源学科各个领域,在全国5个省(区)成立了省级自然资源学会,会员发展到4000人,会员分布在全国与资源有关的科研、生产和教学单位,成为推动我国资源科技事业发展的重要力量。

会议期间,中国能源研究会、中国地理学会、中国地球物理学会、中国土壤学会、中国林学会、中国海洋学会、中国植物学会、中国土地学会、中国青藏高原研究会、中国科学探险协会发来贺信,向大会的召开和中国自然资源学会成立20周年表示热烈祝贺。